International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)
Peer-Reviewed Journal
ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
Vol-13, Issue-4; Apr, 2026
Journal Home Page Available: https://ijaers.com/
Article DOI: https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.134.8

Study of a small-scale system for water desalination and filtration: Reverse osmosis using renewable energy and physicochemical analysis of samples

Estudo de um sistema de pequeno porte para dessalinização e filtragem de água: Osmose reversa com uso de energia renovável e análise físico-quimica de amostras

M. de O. Santos[1], R. A. Menezes Junior[2], M. M. da S. Sá[3], M. G. Nascimento[4], A. C. G. Fernandes[5], L. S. Gomes[6], M. da F. Santana[7], H. da S. Oliveira[8], L. C. M. Nascimento Júnior[9], P. C. de O. Queiroz[10]

[1]Instituto Federal de Sergipe, Lagarto, Sergipe, Brasil.
E-mail: marcos.oliveira@ifs.edu.br; Orcid: https://orcid.org/0009-0007-7659-756X

[2]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: jrmenezes@cear.ufpb.br; Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2311-1278

[3]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: marianamirelly2@gmail.com; Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5574-4515

[4]Corpo de Bombeiros Militar da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
E-mail: fisiconascimento@hotmail.com; Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4551-8463

[5]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: amandafernandestt@gmail.com; Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8462-6171

[6]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: luciano.silva.gomes@aluno.uepb.edu.br; Orcid: https://orcid.org/0009-0002-2230-9116

[7]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: marfonsecas@hotmail.com; Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5497-0147

[8]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: humberto.ufpb@gmail.com; Orcid: https://orcid.org/0009-0003-5633-6347

[9]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: luizcarlospb@yahoo.com.br;
Orcid: https://orcid.org/0009-0009-4622-234X

[10]Universidade Federal do Maranhão, São Luis, Maranhão, Brasil.
E-mail: pc.ufma@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8905-1757

Received: 04 Mar 2026,

Received in revised form: 06 Apr 2026,

Accepted: 12 Apr 2026,

Available online: 16 Apr 2026

©2026 The Author(s). Published by AI Publication. This is an open-access article under the CC BY license

(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Keywords— CS gas, Dermal irritation, GHS 2025, In vivo testing.

Keywords — Reverse Osmosis, Renewable Energy, Water Treatment, Physicochemical Analysis, Small-Scale System, Water Sustainability, Water Filtration, Drinking Water, Energy Efficiency

Palavras-chave— Osmose Reversa, Energia Renovável, Tratamento de Água, Análise Físico-Química, Sistema de Pequeno Porte, Sustentabilidade Hídrica, Filtragem de Água, Água Potável, Eficiência Energética

Abstract— *This article addresses the study, development, and evaluation of a small-scale system for water desalination and filtration, using reverse osmosis integrated with a renewable hybrid energy system. The main objective of the research is to propose an efficient and sustainable system for water treatment in areas facing water scarcity, with a specific focus on the interior of the State of Sergipe, Brazil. The methodology employed combines bibliographic research with experimental research. Water samples were collected and analyzed from an artesian well located in the municipality of Estância, between 2020 and 2022. Water quality analyses were performed in a laboratory environment, before and after the desalination process. The desalination system used employed a small-scale reverse osmosis filter with a flow rate of 16 liters per hour. This water processing system was integrated into a Hybrid Energy System (HES) that uses photovoltaic solar and wind energy to operate the water pump, the cooling system, and the reverse osmosis filter. Furthermore, the study included modeling the energy production for the hydroelectric power plant, based on historical wind speed and solar irradiance data from 1990 to 2020 in regions of the State of Sergipe. The results of the water quality analyses demonstrated the effectiveness of the desalination process. There was a considerable reduction in chloride concentrations (from 50.13 mg/L to 3.71 mg/L) and sodium (from 43.27 mg/L to 3.42 mg/L). The concentration of total dissolved solids also decreased significantly (from 395.1 mg/L to 30.46 mg/L). Physicochemical parameters such as total hardness (from 300 mg/L to 29.74 mg/L) and apparent color (from 31.9 mg/L to 5.4 mg/L) showed drastic reductions and significant improvement, respectively. The process did not alter the concentration of most of the analyzed metals, sulfates, nitrites, and total selenium, with the exception of manganese, which had its concentration reduced. The pH of the water varied slightly from 7.84 to 6.00, but remained within the acceptable limit for potability according to Brazilian legislation. Regarding the system's energy demand, estimated at 57.6 kWh/month, the modeling demonstrated that the average monthly photovoltaic energy production was sufficient to meet this need. Wind energy production in the region was considered less viable due to low production and high cost. In conclusion, the study validated the viability of the desalination system under study, powered by renewable energy, as a promising alternative to guarantee access to potable water in a sustainable way in regions with water scarcity. The results in improving water quality and the adequacy of renewable energy supply support the proposal.*

Resumo— *O presente artigo aborda o estudo, desenvolvimento e avaliação de um sistema de pequeno porte para dessalinização e filtragem de água, utilizando a técnica de osmose reversa integrado a um sistema de energia híbrida renovável. O objetivo principal da pesquisa é propor um sistema eficiente e sustentável para o tratamento de água em áreas que enfrentam escassez hídrica, com foco específico no interior do Estado de Sergipe-Brasil. A metodologia empregada combina pesquisa bibliográfica com pesquisa experimental. Amostras de água foram coletadas e analisadas de um poço artesiano localizado no município de Estância, entre os anos de 2020 e 2022. As análises da qualidade da água*

foram realizadas em ambiente laboratorial, antes e após o processo de dessalinização. O sistema de dessalinização utilizado empregou um filtro de osmose reversa de pequeno porte, com vazão de 16 litros por hora. Este sistema de processamento de água foi integrado a um Sistema de Energia Híbrida (SHE) que utiliza energia solar fotovoltaica e eólica para operar a bomba d'água, o sistema de refrigeração e o filtro de osmose reversa. Além disso, o estudo incluiu a modelagem da produção de energia para o SHE, baseada em dados históricos de velocidade do vento e irradiação solar de 1990 a 2020 em regiões do Estado de Sergipe. Os resultados das análises de qualidade da água demonstraram a eficácia do processo de dessalinização. Houve uma redução considerável nas concentrações de cloretos (de 50,13 mg/L para 3,71 mg/L) e sódio (de 43,27 mg/L para 3,42 mg/L). A concentração de sólidos dissolvidos totais também diminuiu significativamente (de 395,1 mg/L para 30,46 mg/L). Parâmetros físico-químicos como dureza total (de 300 mg/L para 29,74 mg/L) e cor aparente (de 31,9 mg/L para 5,4 mg/L) apresentaram reduções drásticas e expressiva melhora, respectivamente. O processo não alterou a concentração da maioria dos metais analisados, sulfatos, nitritos e selênio total, com exceção do manganês, que teve sua concentração reduzida. O pH da água variou ligeiramente de 7,84 para 6,00, mas permaneceu dentro do limite aceitável para potabilidade segundo a legislação brasileira. Em relação à demanda energética do sistema, estimada em 57,6 KWh/mês, a modelagem demonstrou que a produção média mensal de energia fotovoltaica foi suficiente para atender essa necessidade. A produção de energia eólica na região foi considerada menos viável devido à baixa produção e alto custo. Em conclusão, o estudo validou a viabilidade do sistema de dessalinização estudo, alimentado por energia renovável como alternativa promissora para garantir o acesso à água potável de forma sustentável em regiões com escassez hídrica. Os resultados na melhoria da qualidade da água e na adequação da oferta energética renovável sustentam a proposta.

I. INTRODUÇÃO

Segundo dados da Agência Nacional de Águas – ANA, órgão do governo brasileiro, 97,5% da água existente no mundo é salgada, e portanto, não adequada ao consumo direto, nem à irrigação. Além disto, dos 2,5% de água doce, 69% estão nas geleiras e 30% são águas subterrâneas, sendo só 1% de fácil acesso, em rios e lagos. O Brasil possui 12% da água doce, mas a distribuição natural deste recurso não é equilibrada. A região Norte, por exemplo, concentra cerca de 80% desta água, mas representa apenas 5% da população brasileira; já as regiões centrais e as próximas ao litoral, possuem mais de 45% da população, e menos de 3% dos recursos hídricos do país (ANA, 2020).

A perfuração de poços artesianos é uma das técnicas de obtenção de água mais antigas do mundo, muito comum em todo mundo, havendo registros de mais de 10.000 anos atrás que comprovam a busca do homem por águas subterrâneas (Kavand et al., 2023). Dos programas desenvolvidos pelo governo brasileiro para fornecer água às comunidades residentes em áreas que sofrem com a seca e a estiagem, como o "Polígono das Secas", na região nordeste do Brasil, destacam-se aqueles voltados à instalação de cisternas e perfuração de poços (Oliveira et al., 2021).

Um fator importante para classificação da água de um poço ou de uma cisterna como utilizável para o seu uso é a verificação da qualidade da mesma. Tal verificação se dá por meio da análise de características físico-químicas, pois a água obtida dessa forma pode conter parâmetros com valores indesejados, tornando inviável sua utilização para determinados fins. A salinidade é outro parâmetro a ser observado, pois a água salobra pode fazer mal à saúde animal e vegetal e, a longo prazo, acarretar em alterações dos parâmetros do solo quando usada na irrigação (Dias, Melo & Oliveira, 2020).

Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo o estudo de um sistema protótipo de dessalinização, filtragem, refrigeração e bombeamento da água de forma eficiente,

com uso de energia híbrida renovável a ser utilizado em poços localizados no interior do estado de Sergipe.

II. METODOLOGIA

2.1 Tipo de pesquisa, onde e quando foi realizada

Este artigo traz uma pesquisa de carater bibliográfico, pois baseia-se em dados contidos em textos científicos e bases de dados provenientes de satélite. Também apresenta um perfil de uma pesquisa experimental, pois nesta foram realizados testes para levantamento de informações, tanto em campo, quanto em ambiente laboratorial. Quanto ao poço artesiano analisado, o mesmo está localizado no municipio de Estância, no Estado de Sergipe, situado no Nordeste brasileiro.

As amostras de água foram coletadas e analisadas em um poço no Estado de Sergipe, de 2020 a 2022, cuja água vem à superfície através de bombeamento. A coleta e testes foram realizados no munícipio de Estância (vide Figura 1), no mês de Novembro de 2020. O experimento foi feito sazonalmente, com objetivo de verificar possíveis variações nos resultados dos parâmetros.



Fig.1: Localidades do estudo no estado de Sergipe

2.2 Sistema de dessalinização

Para tratamento da água com a finalidade de remoção de contaminação por particulados, a fim de torná-la potável, foi empregado um filtro de osmose reversa de pequeno porte, com uma vazão de 16 litros por hora (Figura 2).



Fig.2: Filtro de osmose reversa pequeno porte

2.3 Sistema Híbrido de Energia (SHE)

O sistema consistirá em quatro componentes principais, organizados da seguinte maneira: os painéis fotovoltaicos e o aerogerador montados em uma estrutura de suporte, com cabeamento para transporte de tensão e corrente ao sistema de monitoramento e controle.

O painel solar utilizado tem dimensões 200 cm x 100 cm x 4 cm, do tipo policristalino, com uma potência de pico de 350 W. O aerogerador, por sua vez, tem 4 hélices do tipo vertical, com 600 W de potência de pico. Tanto o painel solar, quanto o aerogerador, encontram-se representados na figura 3.

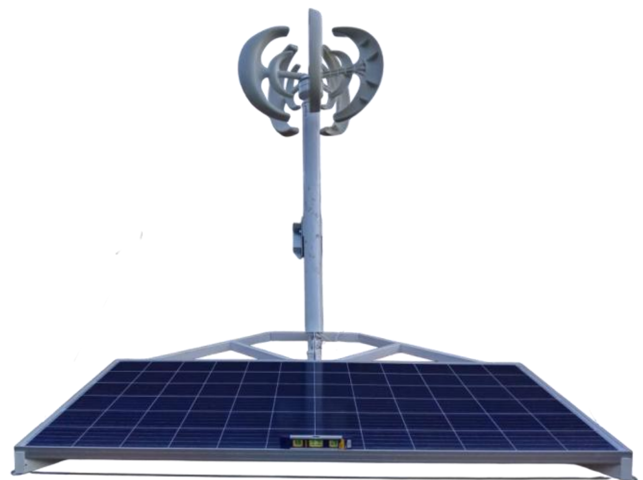


Fig.3: Sistema de Energia Híbrida Renovável

2.4 Integração do Sistema de Dessalinização com o Sistema Híbrido de Energia

O sistema de processamento da água foi integrado ao sistema híbrido de energia apresentado, a fim de bombear, resfriar e filtrar. Para seleção correta do equipamento, levou-se em consideração diversos critérios, a saber: (i) vazão de produção de água dessalinizada em determinado período; (ii) tipo de membrana a ser utilizada no processo de osmose reversa; e (iii) demanda de água da localidade.

Devido a tais dessalinizadores terem custo elevado, esta pesquisa visa constituir um sistema de baixo custo que seja adequado para atender uma demanda menor, pelo uso do SHE da Figura 3. Acredita-se que a partir destes processos, seja possível obter água potável de água salobra de poço.

2.5 Análise da qualidade da água

Para analisar a qualidade da água, fizeram-se coletas da mesma, antes e após o processo de dessalinização, e depois disto, levou-se cada coleta para ser analisada em ambiente laboratorial para estudo da concentração de determinados elementos químicos e observação de certas propriedades físico-químicas, listadas no quadro da figura 4.

Parametros Analisados		
Ensaio	Padrão	Unidade
Antimônio	0,01	mg Sb/L
Arsênio	0,01	mg As/L
Cádmio Total	0,00	mg Cd/L
Chumbo Total	0,01	mg Pb/L
Cromo Total	0,05	mg Cr/L
Cobre Total	2,00	mg Cu/L
Ferro Total	0,30	mg Fe/L
Manganês Total	0,10	mg Mn/L
Alumínio Total	0,20	mg Al/L
Níquel Total	0,07	mg Ni/L
Zinco Total	5,00	mg Zn/L
Bário Total	0,70	mg Ba/L
pH	4-10	6,0 a 9,0
Cor Aparente	15,00	uT
Sólidos Dissolvidos Totais	500,00	mg/L
Dureza Total (mg CaCO3/L)	300,00	mg CaCO3/L
Sódio	200,00	mg Na/L
Cloretos RBLE	250,00	mg Cl/L

Fig.4: Propriedades físico-químicas analisadas

Para uma melhor compreensão da análise da qualidade da água, ela foi dividida em duas etapas: (I) verificação de concentração e propriedades da água do poço sem passagem pelo processo de dessalinização (Figura 5); e (II) verificação de propriedades da água de poço processada por meio do sistema proposto (Figura 6).

Nesta primeira etapa, a água do poço é bombeada até o conjunto filtro-refrigerador. A bomba funcionará a partir da energia elétrica proveniente de baterias, que armazenam a energia híbrida renovável captada no SHE proposto neste trabalho. Parte desta energia será usada para refrigeração da água (Figura 5).

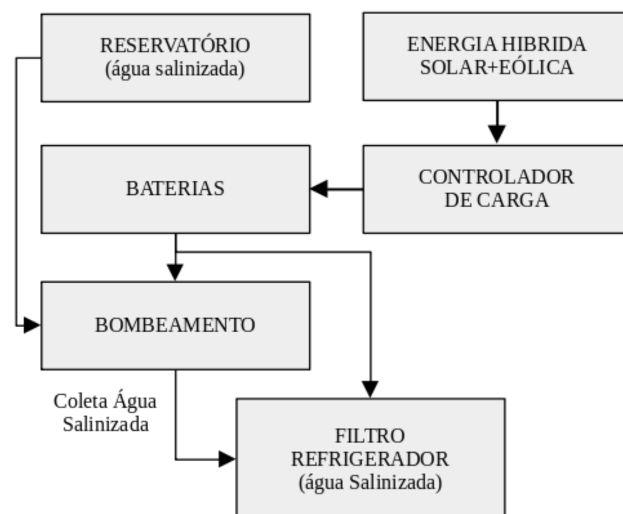


Fig.5: Coleta de água salinizada para análise

Já na segunda etapa, apesar da água do poço também ser bombeada, ela passa pelo dessalinizador (Figura 2) antes de ser levada ao filtro refrigerador. Semelhantemente a etapa anterior, tanto o bombeamento, quanto a refrigeração e a filtragem da água serão realizadas a partir da energia elétrica advinda da energia híbrida renovável captada no SHE proposto (Figura 6).



Fig.6: Coleta de água dessalinizada para análise

Para etapa da análise da água salinizada, foram feitos três gráficos de barra, sendo dada a cor vermelha às barras. O primeiro gráfico contem o nome dos elementos químicos nas ordenadas, enquanto que nas abscissas foram inseridas as concentrações em mg/L (Figura 7).

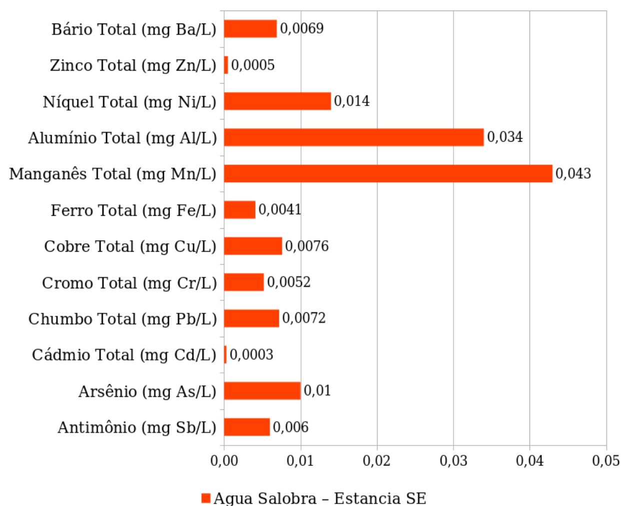


Fig.7: Gráficos de concentração de elementos químicos em mg/L – análise de água salinizada

No segundo e no terceiro gráfico, por conseguinte, foi dado destaque a propriedades físico-químicas comumente observadas nas análises da qualidade da água em geral, tais como dureza total, cor aparente e pH, dentre outras, todas expressas nos gráficos da figura 8.

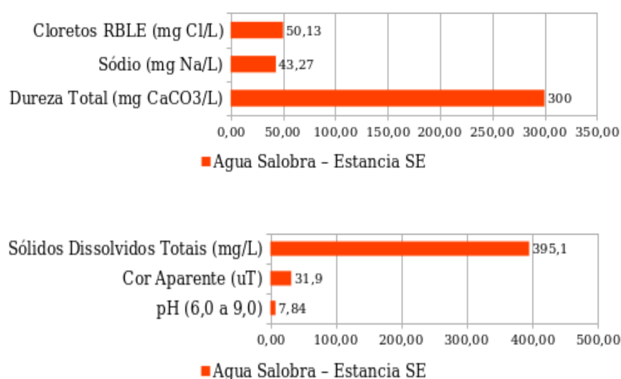


Fig.8: Gráficos de propriedades físico químicas – análise de água salinizada

Na etapa da análise da qualidade da água dessalinizada, foram feitos três gráficos idênticos aos contruídos na etapa anterior, inclusive envolvendo dados das mesmas grandezas e unidades, contudo foi dada a cor azul a cada barra. O primeiro gráfico também apresenta os elementos químicos no eixo das ordenadas e as concentrações de cada um deles nas abscissas (figuras 9).

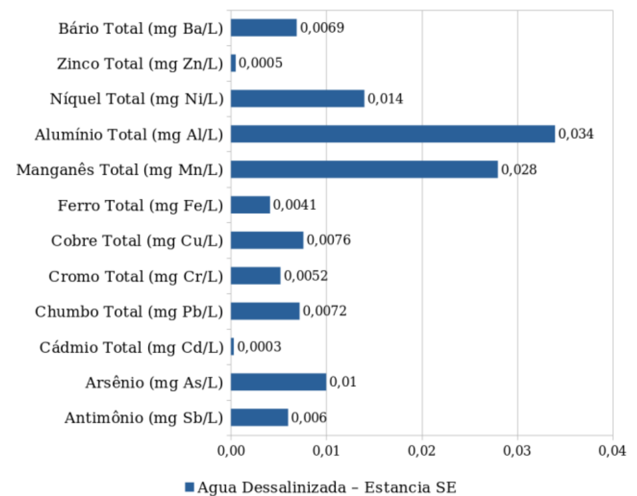


Fig.9: Gráficos de concentração de elementos químicos em mg/L – análise de água dessalinizada

Nos dois últimos gráficos foram destacados as mesmas propriedades físico-químicas observadas na etapa da análise da água salinizada, como pode ser observado na figura 10.

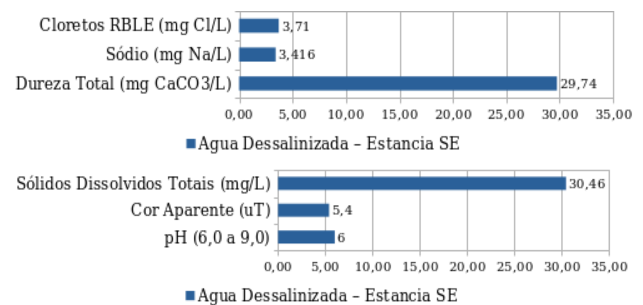


Fig.10: Gráficos de propriedades físico químicas – análise de água dessalinizada

Os gráficos das figuras 7 e 9 comparam as concentrações dos vários elementos químicos (em mg/L) numa amostra de água antes e após a dessalinização. Por sua vez, os gráficos das figuras 8 e 10 apresentam concentrações dos principais indicadores de salinidade e qualidade organoléptica (Cor Aparente e pH) da amostra. Esta análise é essencial para quantificar a remoção de sais e avaliar se a dessalinização fez com quer a água atingisse os padrões de consumo.

2.6 Demanda energética do sistema

Para o levantamento da demanda de energia do sistema, considerou-se 01 bomba de dessalinização e 01 bomba para extrair água do reservatório para superfície, ambas de 48W (0,065 CV), funcionando em torno de 8 horas por dia; além disso, 01 sistema de refrigeração composto por 04 condensadores de 24W funcionando por 12 horas diárias.

A tabela da figura 11 traz a descrição de cada item que utiliza energia elétrica em seu funcionamento, bem como, o tempo de funcionamento diário e o consumo médio mensal

de cada um deles. Nas condições postas, a potência total demandada pelo sistema de processamento da água gira em torno de 57,6 KWh/mês.

Calculo de Demanda do Sistema de Dessalinizaçao, Tratamento e Refrigeraçao					
Elemento	Bombas	Tensão (Volts)	Corrente (Amper)	Tempo Funcionamento (h/dia)	Potencia Demanda (Kwh/mês)
Bomba Dessalinizador	1,0	24,0	2,0	8,0	11,5
Bomba Reservatorio	1,0	24,0	2,0	8,0	11,5
Sistema de Refrigeração	4,0	12,0	2,0	12,0	34,6
Demanda Total Instalada					57,6

Fig.11: Levantamento da potência de demanda do sistema

2.7 Modelagem da produção energética

No modelo de previsão de potência energética fotovoltaica, foi usada a média da irradiância (*short wave*) em W/m^2 para cada mês do ano, desde janeiro de 1990 a dezembro de 2020. Para prognóstico da potência energética eólica, foi usada a média das velocidades do vento em *m/s* para cada mês do ano do mesmo período.

Processamento de dados e Modelo de previsão de potência do sistema fotovoltaico

No que diz respeito à previsão de potência do sistema solar, a análise foi feita com base em dados de radiação solar nas coordenadas geográficas de latitude de 11º23'54"S e longitude de 37º18'55"W (Cidade de Estância – SE), a uma elevação média de 53 metros em relação ao nível do mar. Esses dados foram adquiridos e processados usando imagens de satélite armazenados na base de dados *Terraclimate* pelo uso de programação *JavaScript*, no período que vai de janeiro de 1990 a dezembro de 2020 (Figura 12).

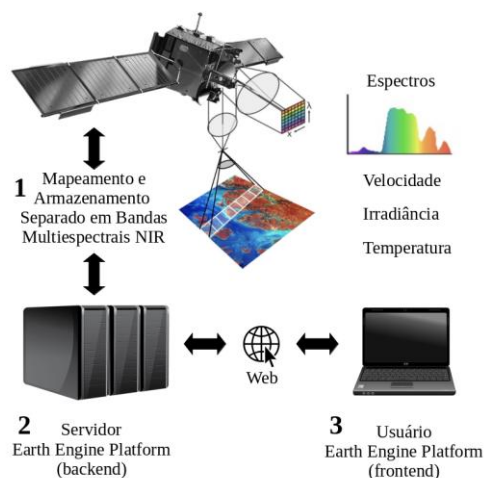


Fig.12: Mapeamento, armazenamento e processamento de dados

O estudo da previsão da potência solar envolveu a consideração do modelo de comportamento elétrico do painel fotovoltaico, representado por um circuito que combina uma fonte de corrente em paralelo com um diodo (modelo de diodo).

Foram adicionadas duas resistências para representar a resistência elétrica entre os contatos da célula e a corrente de fuga do diodo. É importante notar que a corrente fotoelétrica varia linearmente com a temperatura e mantém uma relação diretamente proporcional com a irradiância. Em geral, essa corrente é determinada com base em condições padronizadas (G_n = 1000 W/m^2 e T_n = 25ºC).

Processamento de dados e Modelo de previsão de potência do sistema eólico

Partindo-se do princípio de que o vento possui energia cinética mensurável em função da velocidade, a previsão de potência do sistema eólico foi feita com base nos dados de velocidade do vento obtidos nas coordenadas de latitude e longitude do município de Estância. Os dados relativos ao período de início do ano de 1990 ao final do ano de 2020 foram extraídos e processados a partir do mesmo conjunto de imagens de satélite usados no modelo de previsão de potência do sistema fotovoltaico, a partir da linguagem de programação *JavaScript* (Figura 12). Contudo, deve-se explicitar que não é possível converter em potência efetiva toda potência presente na velocidade do vento que passa através das pás que fazem girar o gerador eólico. Assim, adotou-se o modelo de Betz, quanto à limitação na conversão de potência total em potência efetiva (~ 59,3%) (Freitas, Oliveira & Santos, 2023).

Predições do sistema híbrido fotovoltaico e eólico

Na construção dos gráficos de potência energética fotovoltaica, eólica e total do Sistema, foi realizado um tratamento estatístico a partir dos dados adquiridos, os quais foram expostos por espectros, de maneira que a combinação deles levou à obtenção das variáveis analisadas (Figura 13).

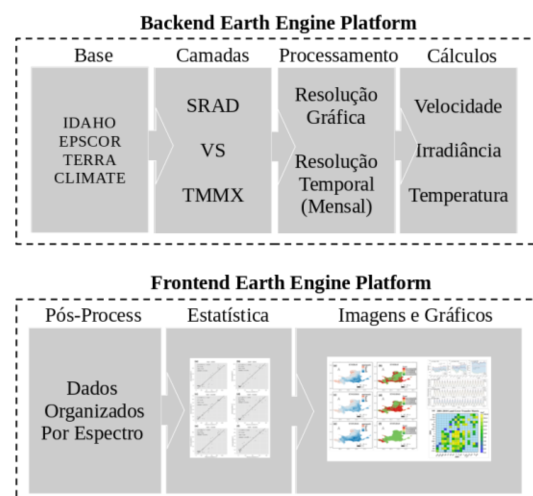


Fig.13: Esquema de tratamento estatístico

Para estudo da capacidade da produção energética, fotovoltaica e eólica no município em estudo, foram construídos dois gráficos para cada fonte de energia. No primeiro gráfico foram expressos no eixo das abscissas os meses do ano, enquanto que no eixo das ordenadas, foram destacadas uma curva para cada ano, de 1990 até 2020, concernente à irradiância média mensal, no gráfico da potência fotovoltaica, e à velocidade média mensal do vento, no gráfico da potência eólica, totalizando 31 curvas.

No segundo gráfico, por sua vez, foram postos no eixo das abscissas os meses do ano, já no eixo das ordenadas, foi destacada uma única curva referente a potência mensal média de Janeiro a dezembro, sendo este valor da média composto pelos valores das potências dos meses entre Janeiro de 1990 a dezembro de 2020.

Finalmente, para expressar a potência total possível de ser gerada pelo SHE em questão, foi feito um gráfico, no qual no eixo das abscissas apareceram os meses do ano, já no eixo das ordenadas, foram expressas a potência. No gráfico, foram constituído três curvas: duas tracajadas e uma contínua. Dentre as curvas tracejadas, a de cor azul representa a potência mensal média eólica, enquanto que a de cor verde representa a potência mensal média fotovoltaica. A curva contínua, por sua vez, representa a potência mensal média total do Sistema Híbrido, expressa na cor vermelha.

III. RESULTADOS

3.1 Qualidade da água

Os dados comparativos apresentados nas Figuras 7 e 9, detalham as concentrações de doze elementos químicos em miligramas por litro (mg/L) em uma amostra de Água Salobra (Figura 7) e Água Dessalinizada (Figura 9), ambas provenientes da cidade de Estância – SE. A principal observação é a redução seletiva na concentração do Manganês Total (Mn), que diminuiu de 0,043 mg/L na água salobra para 0,028 mg/L na água dessalinizada, redução esta percebida com clareza na figura 14, o qual apresenta os dados das Figuras 7 e 9 em um único gráfico. Tal redução de aproximadamente 34,9% sugere que o Manganês, que é frequentemente um contaminante que causa problemas estéticos a água (cor e sabor) e incrustações, foi parcialmente removido pelo sistema de dessalinização ou por uma etapa de pré-tratamento específica (como oxidação seguida de filtração).

(metais)

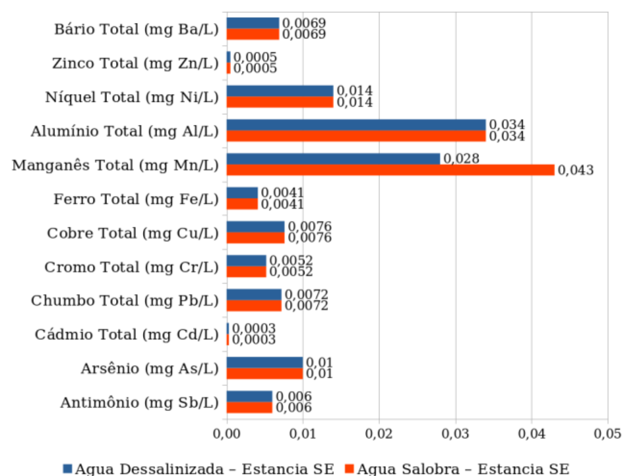
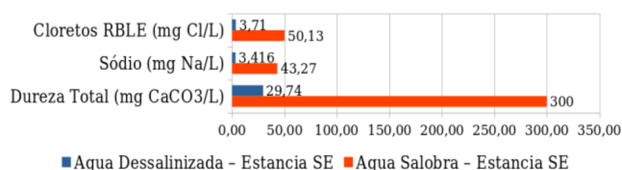


Fig.14: Comparação antes e após a dessalinização

Também foram observados concentrações de cloretos e de sódio, além da concentração de sólidos dissolvidos totais. Tanto o cloreto, quanto o sódio, mostraram uma considerável redução de suas concentrações.

Conforme se observa nas figuras 15 e 17, os cloretos passaram de 50,13 mg/L a 3,71 mg/L, uma redução de mais de 92,6%. O sódio, por sua vez, passou de 43,27 mg/L para 3,42 mg/L, aproximadamente, obtendo-se uma redução em sua concentração de mais de 92,1%. Não diferente dos cloretos e do sódio, a filtragem fez com que houvesse uma grande diminuição também na concentração dos sólidos dissolvidos, que passaram de uma concentração de 395,1 mg/L para 30,46 mg/L.

Figura 15: Comparação antes e após dessalinização (cloretos, sódio e sólidos dissolvidos)



Outrossim, foram vistas ainda propriedades físico-químicas mais destacadas em caso de tratamento de água, tais como dureza total, cor aparente e pH, também expressas nos gráficos das figuras 15 e 17.

A dureza total sofreu uma redução drástica, em razão da diminuição de partículas sólidas no fluido, passando de 300 mg/L para 29,74 mg/L. Já a cor aparente apresentou uma expressiva melhora, passando de 31,9 mg/L para 5,4 mg/L, deixando de ter uma coloração escura para assumir um aspecto límpido e tranparente (Figura 16).



Fig.16: Cor aparente antes e após o processo de dessalinização

A taxa de recuperação é calculada pela razão entre a quantidade de água convertida em água purificada e a quantidade de água processada. Em geral, os valores de taxa de recuperação ficam em torno de 50% (Khare & Bhuiyan, 2022):

$$r(\%)=\left(\frac{Q_p}{Q_a}\right)\cdot 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

r — Nível de recuperação do sistema (%)

Q_p — Vazão recuperada (m³/h)

Q_a — Vazão processada (m³/h)

Finalmente, notou-se que o pH sofreu uma variação, contudo pequena, indo de uma condição um pouco básica (7,84) para um pouco ácida (6).

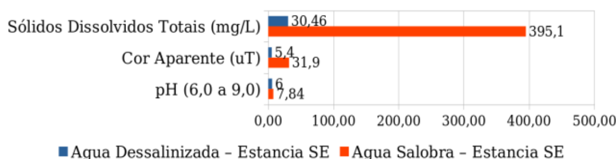


Fig.17: Comparação de Propriedades Físico-químicas (Dureza total, Cor aparente e pH)

3.2 Capacidade de produção de energia fotovoltaica e eólica

O gráfico da figura 18 demonstra a potência energética fotovoltaica mensal média entre 1990 e 2020, e nele está evidenciado que os meses de menor produção energética está em junho e julho de cada ano, com média entre 125W e 130W. Já os picos de produção ocorrem nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, com média de produção acima dos 180W.

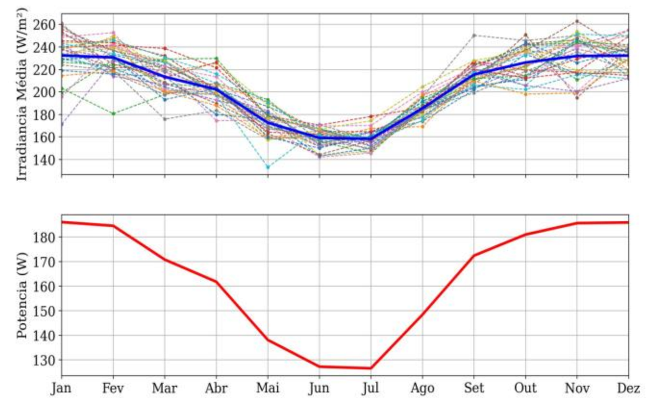


Fig.18: Potência média de 1990 a 2020 (Energia fotovoltaica)

Com relação a potência energética eólica mensal média de 1990 a 2020, o gráfico da figura 19 revela que os meses de valores produtivos menores são novembro e dezembro, com apenas 10W de produção, já os meses de junho e julho apresentam maior nível de produção, com média entre 30W e 35W de potência.

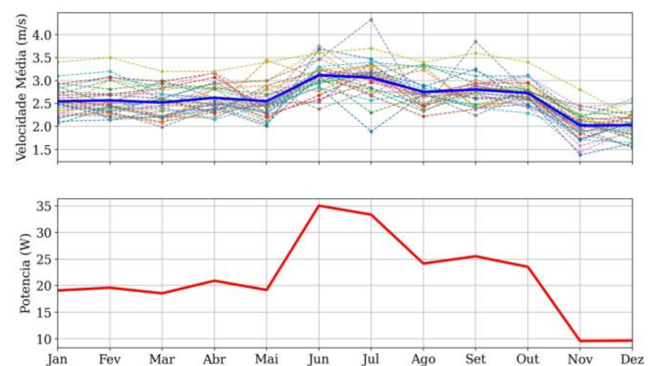


Fig.19: Potência média de 1990 a 2020 (Energia eólica)

Quando se faz uma análise de produção energética associada com geração eólica e fotovoltaica, obtém-se o gráfico da figura 20. Neste, nota-se que somadas, estas formas de energia são capazes de produzir entre 150W e 205W de potência energética mensal média, sendo os meses de maio, junho e julho aqueles com menor índice de produção, enquanto que os meses de janeiro, fevereiro, setembro, outubro, novembro e dezembro são aqueles com maior nível de produção, ficando em torno dos 200W de potência produzida.

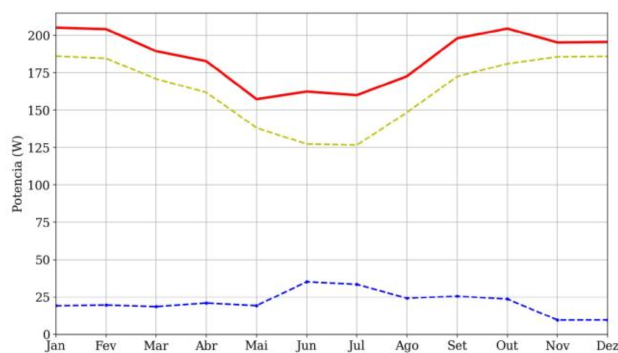


Fig.20: Potência média de 1990 a 2020 (Energia eólica-fotovoltaica)

IV. DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos, nota-se que com relação a proposta de dessalinização de água salobra, o filtro selecionado e o processo adotado se mostrou satisfatório para tornar a água livre de maior parte dos cloretos e sais, além de propiciar enorme redução de partículas sólidas presentes nas amostras.

Destaca-se a estabilidade da concentração de outros elementos analisados, incluindo os cátions alumínio total (0,034 mg/L), níquel total (0,014 mg/L) e bário total (0,0069 mg/L), e os ânions do Arsênio (0,010 mg/L). Tal inalteração na maioria dos elementos pode ser pela: (i) baixa concentração inicial (Fe, Cu, Cr, Pb, Cd, Sb e Zn) (≤0,01 mg/L), podendo a precisão de metodologia analítica ser insuficiente para detectar variações significativas em níveis tão residuais; (ii) forma química do elemento, pois a eficiência da remoção em processos de dessalinização depende do tamanho e da carga iônica; e (iii) seletividade do processo em si, podendo ter feito o sistema de tratamento ser otimizado para o Manganes, que, em geral, é um elemento problemático

O processo mostrou elevadíssima eficácia na remoção de sais e íons responsáveis pela salinidade e dureza, atingindo eficiências superiores a 90% para SDT, Dureza Total, Cloretos e Sódio. A concentração de SDT foi reduzida de 395,1 mg/L para 30,46 mg/L. O valor final de 30,46 mg/L está bem abaixo do Valor Máximo Permitido (VMP) para SDT em água potável (500 mg/L segundo a legislação brasileira), confirmando o sucesso da dessalinização.

A dureza total passou de 300 mg/L (CaCO3) ("água dura") para 29,74 mg/L ("água mole"), indicando excelente rejeição de íons divalentes como Cálcio (Ca2+) e Magnésio (Mg2+), responsáveis pela incrustação e pelos problemas associados à dureza. A remoção de Cloretos e Sódio em mais de 92% demonstra a capacidade do sistema em rejeitar os principais íons que caracterizam a água salobra. O valor final de 3,71 mg/L de Cloretos também está muito abaixo do VMP organoléptico (250 mg/L).

Em relação a cor aparente, houve uma redução significativa de 31,9 uT para 5,4 uT. O valor de 5,4 uT é muito próximo do padrão ideal de potabilidade, que é ter uma cor inferior a 5 uT (Unidade Hazen, ou uH). O pré-tratamento ou a filtração do sistema foi eficiente na remoção de matéria orgânica ou coloidal responsável pela cor.

Quanto ao pH, ele passou de 7,84 (levemente alcalino) para 6,0 (levemente ácido), tal variação não torna a água imprópria ao consumo, já que segundo o Ministério da Saúde do governo brasileiro, este pH está dentro do patamar aceitável para que a água seja considerada potável (Dias, Melo & Oliveira, 2020).

Para se definir a potência energética necessária para se realizar o bombeamento, refrigeração e filtragem da água foi considerado a potência individual de cada elemento que compõe o sistema de dessalinização, sendo observado que para realização deste trabalho, é preciso, no mínimo, uma potência de 57,6 KWh/mês (figura 11).

A fim de se reduzir o risco de ocorrência de déficit de energia durante o fornecimento da mesma ao sistema, admitiu-se neste estudo, um fator de segurança de pelo menos 25% quanto a potência gerada para atender a demanda.

Considerando-se a produção energética do SHE adotado, é possível dizer que a mínima quantidade de energia para bombear, resfriar e filtrar a água conforme proposto, de modo que o suprimento energético seja satisfatório e sem risco de déficit energético, é de cerca de 72,0 KWh/mês.

Contudo, avaliando-se o valor médio mensal de energia fotovoltaica produzidos por m² de área de placa solar, chegou-se a quantidade de 4 m² de área como sendo o mínimo necessário para atender a toda a demanda do sistema. O valor médio de potência produzida por mês através da energia eólica por m² de área varrida pelas hélices do aerogerador, mostra-se baixo quando comparado à potência produzida pela área do sistema solar. A quantidade de energia disponibilizada pelo SHE através das placas solares é superior e mais que suficiente para atender as demandas de energia e o fator de segurança adotado.

Além do mais, em razão da baixa produção de energia por meio do aerogerador e do elevado valor de compra e manutenção do mesmo, a relação custo-benefício torna pouco viável o uso desta forma de energia, já que 4 m² de placa solar são capazes de proporcionar uma produção entre 91,4 KWh/mês e 130,3 KWh/mês, bem além do valor mínimo necessário, conforme se observa na tabela da figura 21 e no gráfico da figura 22.

Calculo da Geração de Energia Solar Médio					
				Area de Paineis Solares (m^2)	4,0
Mês	Potencial de Geracao (Kw/m^2)	Tempo Geracao (h/dia)	Potencia Gerada ($Kwh/dia/m^2$)	Potencia Gerada ($Kwh/mês/m^2$)	Potencia Gerada Total (Kwh/mês)
Jan	0,181	6,0	1,1	32,6	130,3
Fev	0,178	6,0	1,1	32,0	128,2
Mar	0,173	6,0	1,0	31,1	124,6
Abr	0,168	6,0	1,0	30,2	121,0
Mai	0,135	6,0	0,8	24,3	97,2
Jun	0,127	6,0	0,8	22,9	91,4
Jul	0,127	6,0	0,8	22,9	91,4
Ago	0,150	6,0	0,9	27,0	108,0
Set	0,175	6,0	1,1	31,5	126,0
Out	0,178	6,0	1,1	32,0	128,2
Nov	0,179	6,0	1,1	32,2	128,9
Dez	0,179	6,0	1,1	32,2	128,9

Fig.21: Potência média gerada (Energia fotovoltaica)

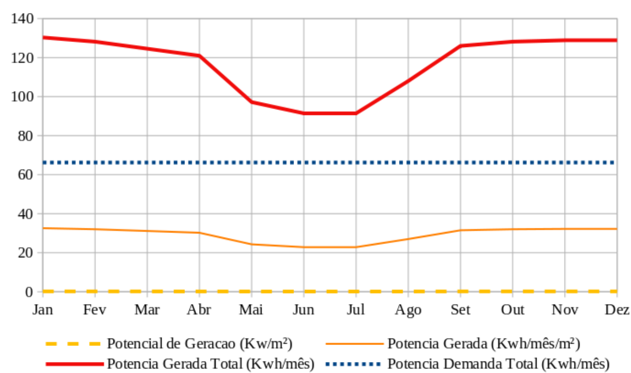


Fig.22: Grafico de Potência média gerada e demandada (Energia fotovoltaica)

O mesmo estudo de capacidade energética realizado para a cidade de Estancia, também foi realizado para as cidades de Lagarto, Carmopolis e Poço Redondo obtendo se os resultados mostrados na Figura 22.



Fig.22: Potência média energia eólica-fotovoltaica

V. CONCLUSÃO

Os gráficos indicam que o processo de dessalinização aplicado na amostra do municipio de Estância – SE demonstrou eficácia parcial e seletiva na remoção de elementos traço. A principal melhoria na qualidade da água, no que tange a estes contaminantes específicos, foi a redução do Manganês Total em cerca de 35%.

A estabilidade de outros elementos, notadamente o Alumínio e o Níquel, em concentrações idênticas entre a água salobra e a dessalinizada, levanta questões sobre a forma química em que esses elementos estão presentes e a capacidade da tecnologia empregada em removê-los efetivamente.

Os resultados alcançados na análise da qualidade da água demonstraram eficácia na melhoria da potabilidade, tanto pela remoção dos sais primários (Sódio, Cloreto, Dureza), quanto pela redução da SDT e da Cor Aparente, resultando em uma água de alta pureza química.

O pH da água, por sua vez, sofreu uma alteração, deixando de ter um teor pouco básico para pouco ácido. A queda no pH e a consequente acidificação da água pós-dessalinização é um fenômeno típico em sistemas de osmose reversa, onde a desmineralização e a remoção da alcalinidade (bicarbonatos) facilitam a dissolução de CO_2 na água, formando ácido carbônico. Esta água ácida pode ser corrosiva às redes de distribuição e, portanto, haveria necessidade de uma etapa final de remineralização e ajuste

de pH (pós-tratamento) para se adequar plenamente aos padrões de potabilidade.

Em relação ao suprimento energético em resposta a demanda (57,6 KWh/mês), a modelagem da produção de energia do Sistema de Energia Híbrida (SHE) possui uma previsibilidade mais que suficiente para atendê-la, isto já considerando um fator de segurança **de 25%**. O estudo indicou que a energia gerada pelas placas solares possui quantidade superior e satisfatória ao funcionamento do sistema. Já, a produção de energia eólica foi considerada baixa, tornando esta fonte menos viável do ponto de vista energetico.

A partir do que fora exposto, conclui-se que os resultados obtidos na melhoria da qualidade da água e na capacidade de suprimento energético, consolidam a proposta de utilização desta combinação tecnológica como alternativa eficiente e sustentável para tratamento e acesso à água potável àqueles que moram em áreas que enfrentam escassez hídrica.

Estudos futuros serão realizados para otimização do sistema buscando aumentar sua eficiência bem como avaliar o desempenho a longo prazo e sua escalabilidade para atender comunidades maiores. Além disso, e importante investigar o potencial de outras fontes renováveis e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia mais eficientes para garantir a contínua operação do sistema proposto.

REFERÊNCIAS

[1] Abdel-Fattah, S. et al. (2024). Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Assessment and Potential in Palestine. An-Najah University Journal for Research - A (Natural Sciences), 38 (2), 112–117.

[2] Anand, B. et al. (2021). A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110787.

[3] Awasthi, M. D. et al. (2021). Contemporary developments in waste water treatment technologies. In Eco-Friendly Energy Processes and Technologies for Achieving Sustainable Development* (pp. 196–219). IGI Global.

[4] Baptista, S., & Tarelho, L. (2020). Analysis of evolution scenarios of Santiago Island energy sector in Cabo Verde. Energy Reports, 6, 574–580.

[5] Biesheuvel, P. et al. (2022). Tutorial review of reverse osmosis and electrodialysis. Journal of Membrane Science, 647, 120221.

[6] Eke, J. et al. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. Desalination, 495, 114633.

[7] Elsaid, K. et al. (2020). Environmental impact of desalination processes: Mitigation and control strategies. Science of The Total Environment, 740, 140125.

[8] Kavand, H., Ziaee, S., & Najafabadi, M. M. (2023). The impact of water conservation policies on the reallocation of agricultural water-land resources. *Frontiers in Water, 5.

[9] Khare, V., & Bhuiyan, M. A. (2022). Tidal energy-path towards sustainable energy: A technical review. Cleaner Energy Systems, 3, 100041.

[10] Okampo, E. J., & Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 140, 110712.

[11] Singh, T. et al. (2020). The Role of Nanofluids and Renewable Energy in the Development of Sustainable Desalination Systems: A Review. Water, 12(7), 2002.

[12] Freitas, L., Oliveira, R., & Santos, M. (2023). Sistemas híbridos para dessalinização: combinação de osmose reversa e energia solar fotovoltaica em comunidades isoladas do semiárido brasileiro. Desalination and Water Treatment, 203, 123-132.

[13] Almeida, F. T., & Silva, J. R. (2021). Uso da osmose reversa na dessalinização de águas salobras: uma revisão crítica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(3), 45-56.

[14] Dias, N. S., Melo, J. S., & Oliveira, R. A. (2020). Caracterização físico-química da água dessalinizada por osmose reversa no semiárido brasileiro. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 19(4), 321-329.

[15] Soares, T. M., Silva, I. J. O., & Farias, C. A. (2021). Dessalinização por osmose reversa: impactos ambientais e soluções sustentáveis para o semiárido nordestino. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(2), 176-182.

[16] Costa, J. R., Lima, T. M., & Barbosa, A. A. (2022). A análise econômica de sistemas de pequeno porte para dessalinização por osmose reversa em comunidades rurais no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 27(1), 89-96.

[17] Cavalcante, J., Sousa, I., & Alves, F. (2020). Dessalinização com energia solar: estudo de caso em sistemas compactos no Nordeste brasileiro. Renewable Energy Journal, 45(3), 78-85.

[18] Pereira, A., Silva, R., & Lima, F. (2021). Osmose reversa como alternativa para a escassez hídrica em regiões semiáridas: desafios e perspectivas no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(5), 105-112.

[19] Oliveira, C. A., et al. (2021). Análise do desempenho de um sistema de osmose reversa para a dessalinização da água do mar no Brasil: uma revisão crítica sobre as tecnologias disponíveis e os desafios enfrentados na implementação desses sistemas em regiões semiáridas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(1), 45-56.

[20] Almeida Junior, F. das C. L., & Cunha Neto, J. C. da S. (2021). Dessalinização da água por osmose reversa: uma alternativa para a escassez hídrica no Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(3), 221-227.

[21] Nunes de Almeida Filho, A. P., Vieira, R. C., & Moura, R. F. V. B. (2021). Estudo sobre a eficiência da dessalinização por osmose reversa em águas salobras na região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(2), 176-182.

[22] Pereira, A. L. S., & Pereira, M. R. C. (2021). Análise econômica da dessalinização por osmose reversa em pequenas comunidades rurais no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(2), 105-112.
[23] Cavalcante, J. R. C., & Sousa, I. T. B. (2021). Utilização da energia solar na dessalinização da água: uma alternativa sustentável para o semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(3), 89-96.
[24] Silva, E. F., & Lima, A. C. B. (2021). Proposta para um sistema híbrido de dessalinização por osmose reversa e energia solar: estudo preliminar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(4), 341-348.
[25] Martins, F. P., & Souza, T. P. (2021). Análise comparativa entre diferentes tecnologias de dessalinização para pequenas comunidades no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(5), 67-75.
[26] Alves, J. C. A., & Barbosa, R. A. C. (2021). Impactos ambientais da dessalinização por osmose reversa: uma revisão crítica sobre os resíduos gerados e suas destinações. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(6), 150-158.
[27] Freitas, L. S., & Oliveira, R. M. S. (2021). Tecnologias alternativas para a dessalinização da água em regiões áridas: uma análise das possibilidades no Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25(5), 400-408.
[28] Costa, J. R. S., & Lima, T. M. S. (2021). Avaliação técnica e econômica do uso de sistemas fotovoltaicos na dessalinização por osmose reversa em pequenas comunidades rurais no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(7), 210-218.
[29] Santos, M. J. D. A., & Queiroz, D. A. C. (2021). Análise da eficiência dos sistemas comunitários de dessalinização por osmose reversa no semiárido brasileiro: um estudo comparativo entre diferentes tecnologias aplicadas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 26(8), 300-308.